阿吉古丽·沙依提,王豫,买买提艾力·买买提依明,等.Noah-MP陆面模式在东疆黑戈壁的适用性[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(5):19-27. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Noah-MP 陆面模式在东疆黑戈壁的适用性

阿吉古丽·沙依提^{1,2,3,4},王 豫^{1,2,3},买买提艾力·买买提依明^{1,2,3*},高佳程^{1,2,3}, 刘军建^{1,2,3},琚陈相^{1,2,3},杨 帆^{1,2,3}

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象
 野外科学试验基地,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002;3.中国气象局树木
 年轮理化重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002;4.新疆气象学会,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:新疆东部黑戈壁作为气候恶劣、人迹罕至及黑色砾石下垫面的生态脆弱区,陆面过 程参数化方案不易确定。利用东疆哈密戈壁陆气相互作用站观测数据集,开展 Noah-MP 陆面模 式离线模拟试验,找出适合戈壁区域的最佳参数化方案组合,给出了土壤湿度对戈壁区域陆气热 交换的影响。结果表明:(1)针对感热通量(H)、净辐射通量(R₀)和土壤地表温度(T₀)均表现为第二 种组合方案的模拟误差(MB)最小,其中 MB_H=18.28 W·m⁻²,MB_{R0}=14.92 W·m⁻²,MB_{T0}=-1.19 ℃,模 式效率(NSE)最高 NSE_H=0.74,NSE_{R0}=0.98,NSE_{T0}=0.96。针对潜热通量(LE)表现为第一种组合方案 模拟效果最佳,其中 MB 为 7.10 W·m⁻²,NSE 为-0.57。(2)模式针对土壤湿度的模拟效果均不好, 模式预报土壤湿度偏干,第七种组合方案的模式效率指数较高,为 0.278。(3)针对土壤 10 cm 温 度,第一种组合方案虽预报效率指数最高,为 0.7,但误差较大,达 1.23 ℃,第二种组合方案误差最 小,为 0.45 ℃。第二种组合方案在东疆黑戈壁地区的普适性最高。(4)Noah-MP 在 RMAPS-CA 系 统中在线耦合后,2 m 温度的预报效果整体优于离线 Noah 模式。

关键词:黑戈壁;东疆;陆面过程参数化方案;Noah-MP 模式

中图分类号: P435.2; P404 文献标识码: A 文章编号: 1002-0799(2023) 05-0019-09

陆面过程作为地球各圈层相互作用的纽带,其 表现不仅受区域气候状况的影响,而且与下垫面特 性密切相关^[1-3]。陆面模型是用来探索地一气能量和 物质交换的重要工具,同时也是全球气候、气象模式 和大气化学模式中的基础组成部分^[4-5]。伴随对陆 面过程的深入认识,陆面模式的相关研究得到快速 发展。1970年以来,一系列大型陆面过程观测实验

收稿日期:2023-04-02;修回日期:2023-05-26

相继展开,促进了陆面模式的快速发展,最初简单的 "水桶"模式已被考虑植被生化过程和碳循环的第三 代陆面模式所取代。在陆面模式大量增加的同时,各 种陆面参数化方案和陆面模式的比较计划也不断出 现^[6-7]。目前应用较广泛的陆面模式有 Noah LSM、 SSiB、CLM、CABLE 等^[8-10]。其中, Noah 陆面模式是在 OSU(Oregon State University)模式的基础上,由众多 研究机构共同发展的^[11],为当前陆面模式中的主流 模式之一。Noah 陆面模式包括土壤热力和水汽传导 2个方程,分别采用常用的热扩散方程及 Richards 方程计算土壤温度和土壤含水量,利用雷诺数方法 确定热量粗糙度与动量粗糙度两者的比率。冠层阻 抗的计算考虑了土壤的有效水分和大气条件(即 Jarvis 方案),而且 Noah 模式还加入了地表径流方

基金项目:科技创新团队(天山创新团队)项目(2022TSYCTD0007); 新疆维吾尔自治区少数民族特培项目;中央级公益科研院所基本科 研业务费项目(IDM2021001,IDM2017001)

作者简介:阿吉古丽·沙依提(1977—),女(维吾尔族),高级工程师, 主要从事气象科普工作和陆面过程研究。E-mail:271029930@qq.com 通信作者:买买提艾力·买买提依明(1978—),男(维吾尔族),研究 员,主要从事陆气相互作用研究。E-mail:ali@idm.cn

案^[12],适用于干旱半干旱地区。陆面过程参数的参数 化方案能够反映下垫面动力学和热力学等特性,是 控制陆一气相互作用的重要因子,在陆面模式与气 候模型的模拟预测中扮演关键角色^[13-15]。因此,确定 最佳陆面过程参数化方案,不仅为深入理解陆气相 互作用机制、优化参数化方案及改进模式预报提供 重要依据,而且对认识当前气候状态及提高气候预 测水平具有重要意义。

戈壁在中国西北地区分布范围广阔^[16],面积约 为 66.1 万 km²,占我国总国土面积的 6.9%^[17]。戈壁 作为干旱半干旱区一种特殊的下垫面,和周围绿洲的 水汽、能量交换对局地大气环流和小气候产生重要影 响^[18-19]。位于新疆东部哈密地区的黑戈壁区域是太阳 能资源丰富的生态脆弱区,气候恶劣、人迹罕至及黑 色砾石下垫等特点使其在干旱半干旱区气候过程中 扮演着重要角色^[20]。近年来,在我国干旱半干旱区域 已陆续开展了一系列陆面观测实验,获得了很多有价 值的观测和分析结果^[21,23]。另外,很多学者利用各种陆 面模式开展了干旱半干旱区陆面过程的模拟实验,评 价不同模式和参数化方案在该区域的适用性^[23-25]。但 目前有关东疆黑戈壁陆面过程参数的研究报道相对 较少,如何选取合适的关键参数化方案来提升陆面模 式在戈壁地区模拟性能的研究工作尚未深入开展。

本文利用东疆黑戈壁红柳河陆气相互作用观测 站资料,对该地域地表粗糙度、地表反照率、土壤导 热率及地表比辐射率进行分析,并将得到的参数替 换为 Noah 模式驱动数据中已有的参数,对戈壁地 区的陆面过程进行模拟,为进一步认识该区域陆面 过程参数特征提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 站点资料

红柳河站位于新疆东部哈密地区和甘肃省交界 处,周围上百公里内无其他测站。土壤发育微弱,石 膏化过程和积盐过程突出,表层有极不稳定的孔状 结皮,其下为棕红色紧实层及石膏层,其下的心土层 为石膏结晶层,土壤发育为石膏棕色荒漠土^[26]。该戈 壁为暖性干旱极干旱气候,年均气温为 6.1 ℃,极端 气温最高可达 40.6 ℃,最低可至-35.1 ℃,年降水量 不超过 50.9 mm^[27]。下垫面以砾石、沙砾为主,地表 植被覆盖稀疏,盖度不足 10%^[20]。本文观测数据来 自红柳河站位于新疆东部哈密地区黑戈壁区域建 立的红柳河陆气相互作用观测站(简称"红柳河站", 41°32′ N,94°43′ E,海拔 1 579 m,图 1)。



观测场照片(b)

1.2 模式介绍

Noah-MP 是 Niu^[9]和 Yang^[10]在 Noah LSM 模式 的基础上构建的具有多个参数化方案选项的陆面模 式,其继承了 Noah LSM 水热耦合过程全面的优点, 并在此基础上有机的耦合了多种不同陆面模式(如 CLM,SSiB等)中的植被冠层、辐射传输方案和水文 模块,使得研究人员可根据研究需要灵活的设置不 同的陆面参数化方案组合^[28]。Noah-MP 中内置了包 含 12 种物理过程在内的 31 个参数化方案(表 1), 本研究将这些物理过程分为 3 类,分别是植被过程 (简称"veg",包含 DVEG,CRS,SFC,RAD)、土壤过 程(简称"soil",包含 BTR,TBOT,INF)和冰、雪、径流 等水文过程(简称 "water",包含 RUN,FRZ,SNF, STC,ALB)。

通过控制单一类型陆面过程中的所有机制改 变,保持其他两类陆面过程的机制选项与默认方案 相同,进行全面实验,研究每类陆面过程中所有方案 组合对热通量模拟结果的扰动,确定每类陆面过程 对于热通量模拟的贡献,得到影响 Noah-MP 对热 通量模拟的主导陆面过程类型。在识别出对热通量 模拟影响较大的陆面过程的基础上,通过控制单个物理过程参数化方案的改变、其他物理过程与默认 方案保持一致,通过统计分析,可评估此组合对热通 量模拟的不确定性。本研究中,针对以上描述的3类 过程12种物理过程,选择各种参数化方案进行了8 种离线试验,从而找出该地区最敏感和预报效果最

| | • | | | | | | | |
|------------|-----------------------------------|----|-----------------------------|----------|--|--|--|--|
| 陆面过 程类型 | 物理过程 | 代号 | 参数化选项 | 默认 方案 | | | | |
| | -1. <i>*</i> | 1 | 给定叶面积指数(LAI)及植 被覆盖率(GVF) | | | | | |
| | 功忿柤 被模型 | 2 | 动态植被过程模型 | | | | | |
| | (DVEG) | 3 | 给定 LAI 及由此计算的 GVF | | | | | |
| | | 4 | 给定 LAI 及最大 GVF | | | | | |
| Veg | 冠层气 孔阳拉 | 1 | Bell-Berry 方案 | 1 | | | | |
| (植被 过程) | (CRS) | 2 | Jarvis 动态方案 | 1 | | | | |
| 过任/ | 湍流输 送过程 | 1 | M-0 方案 | 1 | | | | |
| | (SFC) | 2 | Chen97 方案 | 1 | | | | |
| | 冠层辐 | 1 | 三维冠层形态方案 | | | | | |
| | 射传输 | 2 | 无植被间隙方案 | | | | | |
| | (RAD) | 3 | 基于覆盖度的植被间隙方案 | | | | | |
| Soil | 土壤水 | 1 | Noah 方案 | | | | | |
| | 势因子 (BTR) | 2 | CLM 方案 | 1 | | | | |
| | | 3 | SSiB 方案 | | | | | |
| (土壤 | 冻土渗 透过程 (INF) 土壤底 郑泪度 | 1 | NY06 方案 | 1 | | | | |
| 过程) | | 2 | Koren99 方案 | 1 | | | | |
| | | 1 | Zero-flux 方案 | 2 | | | | |
| | 印面及 (TBOT) | 2 | Noah 方案 | Z | | | | |
| | | 1 | SIMGM 方案 | | | | | |
| | 径流及地 下北 | 2 | SIMTOP 方案 | 1 | | | | |
| | 下水 (RUN) | 3 | Schaake96 方案 | 1 | | | | |
| | | 4 | BATS 方案 | | | | | |
| | 过冷水 | 1 | NY06 方案 | 1 | | | | |
| Water | (FRZ) | 2 | Koren99 方案 | 1 | | | | |
| (水文 | 积雪反照 | 1 | BATS 方案 | 2 | | | | |
| 过程) | 率(ALB) | 2 | CLASS 方案 | 2 | | | | |
| | 雨雪分离 | 1 | Jordan91 方案 | | | | | |
| | 过程 | 2 | BATS 方案 | | | | | |
| | (SNF) | 3 | Noah 方案 | | | | | |
| | 雪/土温积 | 1 | 半隐式方案 | 1 | | | | |
| | 分(STC) | 2 | Noah 方案 | 1 | | | | |

表1 Noah-MP中的参数化方案

好的参数化方案(表 2)。用最优参数化方案组合与 模式默认参数化方案进行对比,定量评价最优参数 方案的模拟能力。考虑到戈壁下垫面地形,依据 Noah-MP陆面模式技术文档,在组合试验中将 Opt_dveg(动态植被模型),Opt_frz(过冷水过程), Opt_inf(冻土渗透过程),Opt_rad(冠层辐射传输), Opt_alb(积雪反照率),Opt_tbot(土壤底部温度), Opt_stc(雪/土温积分)定为固定值。

1.3 评估方法

为了更好地评价模式的模拟效果,本研究中使 用均方根误差(R_{MSE} ,Root-Mean Square Error)、平均 偏差(M_B ,Mean Bias)、模式效率指数(N_{SE} ,Nash-Stucliffe Forecasting Efficiency)等统计变量进行统 计。 R_{MSE} 可直观地给出模拟值与观测值之间的偏差, 值越小,模拟越接近观测值; M_B 是用来计算模拟结 果的准确度,值越小越好; N_{SE} 是用来评估模式可预 报性能力,其取值范围从负无穷到 1.0,等于 1.0 时, 说明模式完美。计算公式如下:

$$R_{\rm MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - O_i)^2}{N}} , \qquad (1)$$

$$M_{\rm B} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} (M_i - O_i) \quad , \tag{2}$$

$$N_{\rm SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \quad . \tag{3}$$

式中:N 为数据的个数, M_i 为某一时刻的模拟值, O_i 为对应时刻的观测值, \overline{O} 为观测平均值。

1.4 陆面模式在线耦合试验

睿图一中亚系统(RMAPS-CA)以WRF v4.0和WRFDA v4.0为核心,采用两重嵌套,全疆水平分辨率3 km,中亚区域水平分辨率为9 km(图 2),采用三维变分同化技术,以U/V为控制变量进行多元观测资料的同化分析,目前每日运行 8 次(00/06/12/18UTC),最长预报时效 80 h。模式物理过程设置为:WSM6 云微物理方案^[29],K-F 对流参数化方案(D02无积云对流方案)^[30],ACM2 边界层参数化方案^[31],RRTMG 长波和短波辐射方案^[32]和 NOAH 陆面方案^[33]。

为了检验陆面过程 Noah-MP 方案在 RMAPS-CA 系统中的预报效果,用于检验的预报样本时间 段为 2017 年 1 月 1 日 00 时(UTC,下同)—1 月 31 日 12 时和 2017 年 7 月 1 日 00 时—7 月 31 日 12 研究论文

沙漠与绿洲气象 Desert and Oasis Meteorology

表 2 Noah-MP 参数化方案优选试验方案

| 古安米刑 | 试验编号 | | | | | | | | | | | |
|----------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| 刀杀天空 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 刀米奶奶 | |
| Opt_dveg | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1->prescribed [table LAI, shdfac=FVEG]; 2->dynamic; 3-> table LAI, calculate FVEG 4->table LAI, shdfac=maximum | |
| Opt_crs | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1-> Ball-Berry; 2->Jarvis | |
| Opt_btr | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1-> Noah; 2-> CLM; 3-> SSiB | |
| Opt_run | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1->SIMGM; 2->SIMTOP; 3->Schaake96; 4->BATS | |
| Opt_sfc | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1.M-0;2.Chen97 | |
| Opt_frz | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1-> NY06; 2->Koren99 | |
| Opt_inf | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1-> NY06; 2->Koren99 | |
| Opt_rad | 1 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 3 | 1->gap=F(3D,cosz);2->gap=0;3->gap=1Fveg | |
| Opt_alb | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1->BATS; 2->CLASS | |
| Opt_snf | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1-Jordan91; 2->BATS; 3->Noah | |
| Opt_tbot | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1->Zero-flux; 2->Noah | |
| Opt_stc | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1->Semi-implicit; 2->Fully implicit | |

注:试验1为模式默认参数化方案,试验9为最优参数化方案组合。

时,每天2次(00时 UTC 和 12时 UTC)更新循环预 报,每次预报时效为24h,样本总数为124个。选取 冬夏两季代表月整月时间段作 Noah-MP 方案和 Noah 方案的预报性能比较,能更充分地了解 Noah-MP 陆面方案在新疆区域的预报表现。利用气象学 上通用的 MET V7.0(Model Evaluation Tools)检验平 台,检验用的实况数据从新疆气象信息中心 Cimiss 数据库中获取。一是对 Noah-MP 和 Noah 两个方案 的高空和地面的模式预报量(高空:温度、U风、V 风、位势高度;地面:2m温度、10m风速)进行站点 检验评分。为公平比较2个系统的预报效果,将检 验范围限定为整个 D02的新疆区域。给出预报相对 于常规探空和地面观测的均方根误差和平均偏差。



图 2 睿图—中亚区域数值预报模式系统预报区域

2 结果与讨论

2.1 不同参数化方案组合模拟实验 采用 Noah-MP 单点模式进行模拟,其运行机 制为某一时刻的输入数据仅会产生同一时刻和所设 置步长内的输出结果。使用 2019 年 8 月 8 日—11 月 12 日经填充的气象数据在模型中进行 8 次循环 使模型稳定(经过一次完整时间序列的模拟称为 1 次循环),取第 8 次的输出数据作为模拟的最终结 果。采用每半小时的数据进行研究。

表3和表4给出的是参数化方案组合后针对感 热通量、潜热通量、净辐射、地表温度、10 cm 土壤温 度和 10 cm 土壤湿度模拟对比结果。由表 3 可以看 出,依据 MB 和 NSE 结果,第二种组合方案对感热 通量的模拟误差最小(18.28 W·m⁻²),模式效率指数 达到 0.74,属于模拟比实际偏高。从模拟的效果来 看,影响感热通量最大的是植被过程和水文过程,植 被过程中湍流输送过程参数化方案影响最大,水文 过程中径流和地下水参数化方案影响最大;对于潜 热通量,看不出影响特别大的参数化方案组合,试验 1#、3#、4#、5#的 RMSE 和 NSE 一模一样, 说明这 4 种组合对潜热通量模拟是一致的。8 种参数化方案 组合对净辐射的模拟效果都不错,模式效率指数普 遍达到 0.95 以上,其中第二种参数化方案组合模式 效率指数最高,为0.98,模拟误差最小(14.92 W·m⁻²), 属于模拟比实测偏高。从模式效率指数可以看出,湍 流输送过程参数化方案对净辐射的影响最大;对于 土壤地表温度,8种参数化方案的模拟效果都不错, 模式效率指数都在 0.91 以上,其中第二种参数化方 案的模式效率达 0.96,模拟误差为-1.19 ℃,说明模 式预报地表温度偏低 1.2 ℃左右。

| 阿吉古丽・沙依提等:Noah- | MP 陆面模式在3 | 东疆黑戈壁的适用性 |
|-----------------|-----------|-----------|
|-----------------|-----------|-----------|

| 表3 不同物理过程对红柳河 | 地区感热通量、潜热通量 | 、净辐射和土壤地表温度模拟的影响 |
|---------------|--------------------|------------------|
|---------------|--------------------|------------------|

| 试验 — 编号 | 感热通量 H | | | 潜热 | 通量 LE | | 净纳 | 土壤 0 cm 温度 T ₀ | | | | |
|------------|---|---|------|---------------------------------|--|-------|---|--|------|----------------|--------------|------|
| | $\begin{array}{c} \textit{RMSE/} \\ (W \cdot m^{-2}) \end{array}$ | $\begin{array}{c} \textit{MB/} \\ (W \cdot m^{-2}) \end{array}$ | NSE | $\frac{RMSE}{(W \cdot m^{-2})}$ | $\frac{MB}{(\mathbf{W}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{m}^{-2})}$ | NSE | $\begin{array}{c} RMSE/\\ (W \cdot m^{-2}) \end{array}$ | $\begin{array}{c} \textit{MB/} \\ (\mathbf{W}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{m}^{-2}) \end{array}$ | NSE | <i>RMSE/</i> ℃ | <i>MB/</i> ℃ | NSE |
| 1 | 54.95 | 24.72 | 0.45 | 14.85 | 7.10 | -0.57 | 38.32 | 20.39 | 0.96 | 3.24 | -1.99 | 0.92 |
| 2 | 37.49 | 18.28 | 0.74 | 16.29 | 7.68 | -0.89 | 28.99 | 14.92 | 0.98 | 2.18 | -1.19 | 0.96 |
| 3 | 54.95 | 24.72 | 0.45 | 14.85 | 7.10 | -0.57 | 38.32 | 20.39 | 0.96 | 3.24 | -1.99 | 0.92 |
| 4 | 54.95 | 24.72 | 0.45 | 14.85 | 7.10 | -0.57 | 38.32 | 20.39 | 0.96 | 3.24 | -1.99 | 0.92 |
| 5 | 54.95 | 24.72 | 0.45 | 14.85 | 7.10 | -0.57 | 38.32 | 20.39 | 0.96 | 3.24 | -1.99 | 0.92 |
| 6 | 48.10 | 18.14 | 0.58 | 23.77 | 15.37 | -3.01 | 43.30 | 23.67 | 0.94 | 3.50 | -2.18 | 0.90 |
| 7 | 52.16 | 22.53 | 0.50 | 17.70 | 9.91 | -1.23 | 39.96 | 21.54 | 0.95 | 3.32 | -2.05 | 0.91 |
| 8 | 53.71 | 23.80 | 0.47 | 16.20 | 8.43 | -0.87 | 39.02 | 20.89 | 0.96 | 3.27 | -2.02 | 0.91 |
| 9 | 32.19 | 10.59 | 0.81 | 29.98 | 18.68 | -5.39 | 36.60 | 20.26 | 0.96 | 2.63 | -1.61 | 0.94 |

注:加粗表示误差最小。

由表4可以看出,8种参数化方案组合对土壤 湿度的模拟效果不如感热通量、净辐射和土壤地表 温度。8种方案的模式效率指数在0.19以上,其中 第七种方案的模式效率指数达到0.278,土壤湿度 的误差为0.0858m³·m⁻³,平均误差为-0.02746 m³·m⁻³,说明模式预报土壤湿度偏干;对于土壤10 cm 温度来说,8种方案中,第一种方案即模式默认方案 的预报效率指数最高,达0.695,误差在1.2℃左右, 第二种方案虽然模式效率指数不是最高,但模拟和实 测误差最小的一种方案,土壤10 cm 温度误差为0.4℃, 即模式预报结果比实测低0.4℃。

表4 不同物理过程对红柳河地区 10 cm 土壤 温度和土壤湿度模拟的影响

| 试验 | 10 cr | n 土壤湿度 | 土壤 10 cm 温度 | | | |
|----|--|--|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|
| 编号 | $R_{\rm MSE}/({\rm m}^3\cdot{\rm m}^{-3})$ | $M_{\rm BE}/({\rm m}^3 \cdot {\rm m}^3)$ | ³) $N_{\rm SE}$ | $R_{\rm MSE}/^{\circ}$ C | $M_{\rm BE}/^{\circ}{ m C}$ | $N_{\rm SE}$ |
| 1 | 0.090 | -0.036 | 0.198 | 3.39 | -1.23 | 0.70 |
| 2 | 0.092 | -0.039 | 0.170 | 4.14 | -0.45 | 0.55 |
| 3 | 0.090 | -0.036 | 0.198 | 3.39 | -1.23 | 0.70 |
| 4 | 0.090 | -0.036 | 0.198 | 3.39 | -1.23 | 0.70 |
| 5 | 0.090 | -0.036 | 0.198 | 3.39 | -1.23 | 0.70 |
| 6 | 0.086 | -0.013 | 0.272 | 3.49 | -1.46 | 0.68 |
| 7 | 0.085 | -0.027 | 0.278 | 3.42 | -1.31 | 0.69 |
| 8 | 0.087 | -0.032 | 0.247 | 3.40 | -1.26 | 0.69 |
| 9 | 0.088 | -0.010 | 0.241 | 4.18 | -0.91 | 0.54 |

2.2 模式默认参数化方案与最优参数化方案对比 根据以上误差和模式预报效率指数,确定了12 种物理过程的最佳参数方案组合,即第9个试验。该

试验方案中针对植被过程中的冠层气孔阻抗方案 (CRS)选择了 Jarvis 动态方案(编号为 2),湍流输送 过程方案(SFC)选择了 Chen97 方案,冠层辐射传输 (RAD) 选择了基于植被覆盖度的植被间隙方案:针 对土壤过程中的土壤因子 (BTR), 选择了 Noah 方 案;针对地表水文过程中的径流和地下水(RUN),选 择了 SIMTOP 方案。由表 3~4 可知,最优组合方案对 感热通量、净辐射通量、0 cm 土壤地表温度预报效 果最好,但对潜热通量、10 cm 土壤湿度和 10 cm 土壤 温度的预报效果不太理想,可能戈壁地区潜热通量 整天都很小,甚至可以忽略¹³⁴,因此潜热通量变化本 来就不明显。另外,由于 Noah-MP 模式使用均质土 壤类型,不考虑土壤质地的垂直变化^[3],且本文计算 土壤参数的过程中没有考虑其他原因(如有机质含 量,参数随深度的变化)影响,造成10 cm的土壤温 湿度预报效果不理想。

由图 3~8 可知,无论是模式默认参数化方案还 是本研究提出来的最优参数化方案,对感热通量,净 辐射、地表温度、10 cm 土壤温度预报的效果比较好, 其中对感热通量,净辐射、地表温度本研究提出的最 有参数化方案效果最佳。对于 10 cm 土壤湿度和潜热 通量,两种参数化方案都很好的模拟了潜热和土壤 湿度的变化趋势,但预报数值幅度差异较大。Noah-MP 模式默认参数化方案,对潜热通量预报效果较 好。对于 10 cm 土壤湿度,除了下雨前后没有捕捉到 以外,模式默认参数化方案预报效果与实况更加接 近,本研究提出的最优参数化方案预报值偏大。

2.3 陆面模式在线耦合试验

从哈密国家站 2 m 温度 24 h 预报的检验结果



(表 5)可知, Noah-MP 在 RMAPS-CA 系统中 2 m 温度的预报效果整体优于 Noah, 红柳河站的冬季的预报偏差减小 0.52 ℃, 减小 37.3%, 夏季的 2 m 温度预报略差于 Noah 的预报效果, 增大 0.03 ℃, 增大 5%。Noah-MP 方案对七角井、淖毛湖、伊吾、沁城 4 个国家站的 2 m 温度预报偏差均小于 Noah。Noah-MP 在红柳河站 2 m 温度的均方根误差均小于 Noah, 分别减小 1.06 和 0.10, 减小率为 26.9%和 5.4%, Noah-MP 对七角井、淖毛湖、伊吾、沁城的冬季 2 m 温度均方根误差也小于Noah, 对夏季七角



井、淖毛湖、伊吾、哈密的夏季2m温度均方根误差也小于Noah。

从哈密国家站 10 m 风速 24 h 预报的检验结果 (表 6)可知, Noah-MP 在 RMAPS-CA 系统中 10 m 风速的预报效果和 Noah 各有优劣,红柳河站冬季 的预报偏差增大 0.02 m·s⁻¹,增大 4.4%,夏季的 10 m 风速预报差于 Noah 的预报效果,增大 0.67 m·s⁻¹,增 大 369.25%。Noah-MP 方案在冬季对淖毛湖、伊吾

| | | | Ľ | | | | | | |
|-----|-------|---------|-------|---------|------|---------|---------|---------|--|
| 张臣 | 冬 | ·季 ME | 夏 | 〔季 ME | 冬 | ≸ RMSE | 夏季 RMSE | | |
| 如夕 | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | |
| 七角井 | -2.52 | -2.27 | -1.13 | -1.06 | 3.88 | 3.86 | 2.30 | 2.22 | |
| 巴里坤 | 5.87 | 6.67 | -3.02 | -3.81 | 7.04 | 7.90 | 3.77 | 4.38 | |
| 淖毛湖 | -0.53 | -0.50 | 0.76 | 0.40 | 2.38 | 2.09 | 1.97 | 1.65 | |
| 伊吾 | -3.25 | 0.99 | -0.24 | -0.70 | 4.14 | 2.61 | 2.03 | 2.01 | |
| 哈密 | -1.31 | -2.06 | 3.78 | 3.37 | 3.41 | 3.97 | 4.25 | 4.01 | |
| 沁城 | -2.50 | 1.65 | -1.39 | -1.53 | 3.93 | 3.55 | 2.14 | 2.26 | |
| 红柳河 | -1.39 | -0.87 | 0.65 | 0.68 | 3.93 | 2.87 | 1.84 | 1.74 | |

表5 哈密地区国家站2m温度24h预报的

注:哈密地区国家站地面气象要素的检验结果为00时和12时起报的平均值,灰色阴影为Noah-MP检验效果较好。

24个国家站的 10 m 风速预报偏差均小于 Noah。在 夏季对七角井、巴里坤、哈密、沁城 4个国家站的 10 m 风速预报偏差均小于 Noah。在 2 m 温度的均方根在 检验评分看, Noah-MP 在红柳河站的均方根误差冬 季小于 Noah, 减小 0.11 m·s⁻¹, 减小率为 5.6%, 夏季 大于 Noah, 端大 0.39 m·s⁻¹, 增大率为20.2%, Noah-MP 对伊吾、哈密的冬季 10 m 风速均方根误差也小 于 Noah, 对夏季七角井、巴里坤、伊吾的 10 m 风速均 方根误差小于 Noah。

表 6 哈密地区国家站 10 m 风速 24 h 预报的 检验结果 m·s⁻¹

| 站号 | 冬 | -季 ME | 夏 | 〔季 ME | 冬 | 季 RMSE | 夏季 RMSE | | |
|-----|-------|---------|-------|---------|------|---------|---------|---------|--|
| | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | Noah | Noah-MP | |
| 七角井 | 0.01 | 0.73 | -1.13 | 0.42 | 2.39 | 2.56 | 3.22 | 3.21 | |
| 巴里坤 | 1.98 | 2.33 | 0.20 | 0.10 | 2.79 | 2.98 | 1.67 | 1.39 | |
| 淖毛湖 | 1.31 | 1.30 | 1.60 | 2.06 | 1.89 | 1.20 | 2.65 | 2.89 | |
| 伊吾 | 1.02 | 0.87 | 1.40 | 1.53 | 2.55 | 2.09 | 2.37 | 2.28 | |
| 哈密 | 1.67 | 1.72 | 2.19 | 2.07 | 1.93 | 1.92 | 2.64 | 2.70 | |
| 沁城 | -0.03 | -0.24 | -0.61 | -0.33 | 1.83 | 1.92 | 2.35 | 2.46 | |
| 红柳河 | 0.39 | 0.41 | 0.18 | 0.85 | 1.96 | 1.85 | 1.94 | 2.33 | |

注:哈密地区国家站地面气象要素的检验结果为 00 时和 12 时起报的平均值,灰色阴影为 Noah-MP 检验效果较好。

3 结论

本文基于陆气相互作用观测数据集,开展了 Noah-MP的离线模拟试验,找出适合于戈壁区域的 最佳参数化方案,并给出了土壤湿度对戈壁区域陆 气热交换的影响,得到如下结论:

(1)针对感热通量、潜热通量,第二种参数化方 案组合对感热通量的模拟误差最小(18.28 W·m⁻²), 模式效率指数达到 0.74,模拟值偏高。针对净辐射通量,8 种参数化方案组合的模式效率指数均达到 0.95 以上,其中第二种参数化方案组合模式效率指数最高,为 0.975,模拟误差最小(14.92 W·m⁻²)。

(2)针对土壤地表温度,8种参数化方案组合的 模拟效果均不错,模式效率指数都在0.91以上,其 中第二种参数化方案的模式效率达0.96,模拟误差 为-1.19℃,说明模式预报地表温度偏低1.2℃左 右。针对土壤湿度,模式的模拟效果均不好,效率指 数在0.19以上,其中第七种方案的模式效率指数达 到0.278,平均误差为-0.02746m³·m⁻³,模式预报土 壤湿度偏干。针对土壤10cm温度,第一种方案即模 式默认方案的预报效率指数最高,误差在1.2℃左 右,第二种方案虽然模式效率指数不是最高,但是为 模拟和实测误差最小的一种方案,模式预报结果比 实测低0.4℃。

(3)从陆面模式在线耦合结果来看,Noah-MP在 RMAPS-CA系统中2m温度的预报效果整体要优于 Noah。第二种方案在东疆黑戈壁地区的普适性最高。 参考文献:

- [1] 孙菽芬.陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M].北 京:气象出版社,2005.
- [2] 汪薇,张瑛.陆面过程模式的研究进展简介[J]. 气象与减 灾研究,2010,33(3):1-6.
- [3] ZHANG Renhe, ZUO Zhiyan. Impact of spring soil Moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in east China [J]. Journal of Climate, 2011, 24(13): 3309-3322.
- [4] 刘惠民,陆面过程模型研究进展简介[J].气象研究与应 用,2009(4):35-37.
- [5] 孙帅,师春香,梁晓,等.不同陆面模式对我国地表温度模 拟的适用性评估[J].应用气象学报,2017(6):99-111.
- [6] HENDERSONSELLERS A, YANG Z L, DICKINSON R E. The project for intercomparison of land -surface parameterization schemes [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 74(4):489–503.
- [7] DIRMEYER P A, DOLMAN A J, SATO N. The pilot phase of the Global Soil Wetness Project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(5):851-878.
- [8] 叶丹,张述文,王飞洋,等.基于陆面模式 Noah-MP 的不同参数化方案在半干旱区的适用性 [J]. 大气科学,2017 (1):189-201.
- [9] 闫炎. 陆面模式 SSiB 和 NOAH 对中国夏季降水模拟影 响的比较研究[D].北京:北京大学,2011.
- [10] 朱德琴,高晓清,陈文.陆面模式(SSiB)对敦煌荒漠戈壁 下垫面陆面过程的模拟及敏感性试验 [J]. 中国沙漠, 2006,26(3):466-472.

- [11] NIU G Y, YANG Z L, MITCHELL K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah – MP):1. Model description and evaluation with local–scale measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116:1–19.
- [12] YANG Z L, CAI X, GANG Z, et al. The Community Noah Land Surface Model with Multi parameterization Options (Noah-MP):evaluation over global river basins[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116:1-16.
- [13] 陈杨瑞雪,罗亚丽.不同边界层参数化方案和陆面过程 参数化方案对一次梅雨锋暴雨显式对流模拟的影响分 析[J]. 热带气象学报,2016,32(5):656-667.
- [14] CHEN R, YANG M X, WANG X J, et al. Review on simulation of land -surface processes on the Tibetan Plateau [J]. Cold and Arid Region Science, 2019, 11(2): 93-115.
- [15] ZHENG Y, BRUNSELL N A, ALFIERI J G, et al.Impacts of land cover heterogeneity and land surface parameterizations on turbulent characteristics and mesoscale simulations [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2021:1-22.
- [16] 胡月宏,艾力·买买提明,宗飞,等.新疆戈壁地区近地面 大气折射率结构常数观测对比[J].中国沙漠,2017 (6): 189-191.
- [17] 钱广强,董治宝,罗万银,等,基于数字图像的中国西北 地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J].中国沙漠,2014,34
 (3):625-633.
- [18] FENG Y, WU B, YAO A, et al.A study on classification system and inventory of gobi[J].Acta Geographica Journa, 2014,69(3):391-398.
- [19] ZHANG Q, WEI G, HUANG R, et al. Bulk transfer coefficients of the atmospheric momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of northwest China [J].Science in China, 2002, 45(5): 468– 480.
- [20] 申元村,王秀红,程维明,等,中国戈壁综合自然区划研 究[J].地理科学进展,2016,35(1):59-68.
- [21] 刘远永,文军,韦志刚,等.黄土高原塬区地表辐射和热 量平衡观测与分析[J].高原气象,2007,26(5):928-937.
- [22] 李宏宇,张强,王胜.陇中黄土高原夏季陆面辐射和热量 特征研究[J]. 地球科学进展,2010,25 (10):1070-1081.
- [23] 房云龙,孙菽芬,李倩,等.干旱区陆面过程模型参数优 化和地气相互作用特征的模拟研究[J].大气科学,2010,

34 (2):290-306.

- [24] 孟祥新,符淙斌.不同陆面过程模式对半干旱区通榆站 模拟性能的检验与对比 [J].气候与环境研究,2009,14
 (4):352-362.
- [25] CHEN Y Y, YANG K, ZHOU D Q, et al. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length [J].J Hydrometeorol, 2010, 11 (4):995–1006.
- [26] 阿吉古丽·沙依提,张坤,王豫.东疆黑戈壁太阳紫外辐 射变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象,2020,83(5):124-131.
- [27] 李如琦.红柳河气温与降水气候特征分析[J]. 农技服务, 2009,26(12):107-108.
- [28] CAI X, YANG Z L, DAVID C H, et al. Hydrological evaluation of the Noah-MP land surface model for the Mississippi River Basin [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(1):23-38.
- [29] HONG S-Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly Weather Review, 2006, 134 (9): 2318-2341.
- [30] PLEIM J E.A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I:Model description and testing [J].Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(9):1383–1395.
- [31] MLAWER E J,TAUBMAN S J,BROWN P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J].Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D14): 16663-16682.
- [32] DUDHIA J, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46 (20); 3077-3107.
- [33] CHEN Y, YANG K, ZHOU D, et al.Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4):995-1006.
- [34] 周德刚,黄刚,马耀明.中国西北干旱区戈壁下垫面夏 季的热力输送[J].大气科学学报,2012,35(5):541-549.
- [35] 李得勤,段云霞,张述文,等.土壤湿度和土壤温度模拟 中的参数敏感性分析和优化[J].大气科学,2015,39(5): 991-1010.

Applicability of Noah–MP Land Surface Model in the Black Gobi of Eastern Xinjiang

Hajigul Sayit^{1,2,3,4}, WANG Yu^{1,2,3}, Ali Mamtimin^{1,2,3}, GAO Jiacheng ^{1,2,3}, LIU Junjian ^{2,3}, JU Chenxiang ^{1,2,3}, YANG Fan ^{1,2,3}

(1.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China/National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of CMA, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, China;

3.Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration,

Urumqi 830002, China; 4. Xinjiang Meteorological Society, Urumqi 830002, China)

Abstract As an ecologically fragile area with severe climate, few people and black gravel underlying in the eastern gobi region of Xinjiang, the land surface process parameterization scheme is not easy to determine. Based on the observation data set of land -air interaction, Noah and Noah -MP offline simulation tests were carried out to find out the best parameterization scheme suitable for the gobi region, and the effect of soil moisture on land-air heat exchange in the gobi region was given. The conclusions are as follows: (1)For sensible heat flux (H), net radiant flux (R_0) and soil surface temperature (T_0) , the simulation error (MB) of the second combination scheme is the smallest, where $MB_{\rm H}$ =18.28 W·m⁻², $MB_{\rm R0}$ =14.92 W·m⁻², $MB_{\rm T0}$ =-1.19 °C, and the highest model efficiency (NSE) is $NSE_{\rm H}=0.74$, $NSE_{\rm R0}=0.98$, $NSE_{\rm T0}=0.96$. The first combination scheme has the best simulation effect for latent heat flux (LE), with MB of 7.10 W·m⁻² and NSE of -0.57. (2) The simulation effect of the model on soil moisture is not good, and the model predicts dry soil moisture. The seventh combination scheme has a higher model efficiency of 0.278.(3) For the soil temperature of 10 cm, although the first combination scheme has the highest prediction efficiency index of 0.7, the error is relatively large, reaching 1.23 °C. The second combination scheme has the smallest error, reaching 0.45 °C. In summary, the second combination scheme has the highest universality in the black gobi region of eastern Xinjiang. (4) After online coupling in the RMAPS-CA system, the overall prediction effect of Noah MP at 2 m temperature is better than that of offline Noah model.

Key words black gobi; eastern Xinjiang; land surface process parameterization scheme; Noah mode